

# 水生态环境中不同建材基质附着藻类的生物学特征

赵志淼<sup>1,2</sup>, 陈霆宇<sup>1</sup>, 宗兵年<sup>3</sup>, 陈瀚驰<sup>4</sup>, 鲁仙<sup>1</sup>, 陆浩磊<sup>1</sup>, 张饮江<sup>1,2</sup>

(1.上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2.水域生态环境上海高校工程研究中心, 上海 201306; 3.同济大学 农业环境与生态研究所, 上海 201804; 4.上海同瑞环保工程有限公司, 上海 200040)

**摘要:** [目的] 开展不同附着藻类生物学特征的试验, 分析水质指标与藻类生物学特征的关系, 为筛选科学合理的附着基质, 丰富附着藻类着生提供科学支持。[方法] 通过模拟试验, 分析 3 种不同建材基质(花岗岩、聚乙烯网、木板)附着藻类的生物学特征, 筛选出效果好且易于资源化利用的附着基质类型。[结果] 花岗岩和木板基质的附着藻类群落更加稳定, 生物学特征更优, 功能性藻类种类更多, 更有利于发挥附着藻类在水环境中的生态效应。[结论] 综合考虑可利用程度和操作的难易程度, 花岗岩基质是 3 种基质中最合适的基质。

**关键词:** 附着藻类; 建材基质; 藻类群落; 生物学特征

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)06-0049-08

**中图分类号:** X826

**文献参数:** 赵志淼, 陈霆宇, 宗兵年, 等. 水生态环境中不同建材基质附着藻类的生物学特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 49-56. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.007; Zhao Zhimiao, Chen Tingyu, Zong Bingnian, et al. Biological characteristics of periphytic algae on different building material substrates in water eco-environment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 49-56.

## Biological Characteristics of Periphytic Algae on Different Building Material Substrates in Water Eco-environment

Zhao Zhimiao<sup>1,2</sup>, Chen Tingyu<sup>1</sup>, Zong Bingnian<sup>3</sup>, Chen Hanchi<sup>4</sup>, Lu Xian<sup>1</sup>, Lu Haolei<sup>1</sup>, Zhang Yinjiang<sup>1,2</sup>

(1.College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306,

China; 2.Water Environment and Ecology Engineering Research Center of Shanghai Universities,

Shanghai 201306, China; 3.Institute of Agricultural Environment and Ecology, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4.Shanghai Tongrui Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

**Abstract:** [Objective] The biological characteristics of different attached algae were determined and the relation between water quality indicators and algae biological characteristics were analyzed in order to provide scientific support for screening scientifically reasonable attached substrates and enriching the growth of attached algae. [Methods] The biological characteristics of algae attached to three different building material substrates (granite, polyethylene mesh, wood) were analyzed using simulation experiments. The types of attached substrates having good effects and easy resource utilization were selected. [Results] The periphytic algae communities attached to granite and wood substrates were more stable, and had better biological characteristics and more functional algae species, and thereby were more conducive to providing an ecological effect of periphytic algae in the water environment. [Conclusion] The granite substrate was considered to be the most suitable substrate among the three tested substrates because of its ready availability and ease of use.

**Keywords:** periphytic algae; building material substrate; algal community; biological characteristics

水是生命之源, 发挥着支撑人类生存、文明进步及社会发展的作用。中国人均淡水资源占有量较低, 水环境问题虽然得到一定程度的缓解, 但水资源不足等问题仍需重视。中国生态环境质量公报<sup>[1]</sup>分析, 2016—2020 年来中国淡水资源的质量正在逐步改

善, 地表水、河流水和湖泊水 3 类及以上的水质比例均提高了超过 10%; 但淡水水库(湖泊)的水体富营养化却略加严重, 贫营养和中营养水体比例均有下降, 轻富营养化水体比例提高了 5.1%, 中富营养化水体比例基本持平。水体富营养化问题不容忽视, 因此

收稿日期: 2023-01-18

修回日期: 2023-04-19

资助项目: 上海市科学技术委员会项目“自然光驱动水生生态系统引导构建技术研究”(20dz1204404)

第一作者: 赵志淼(1986—), 女(满族), 黑龙江省双城市人, 博士, 主要研究方向为水域生态化技术研发与应用。Email: zmzhao@shou.edu.cn.

通信作者: 张饮江(1961—), 男(汉族), 上海市人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事水域生态工程方面的研究。Email: yjzhang@shou.edu.cn.

加强监测、预防及缓解水体富营养化,对水域生态环境保护与修复具有重要意义。

缓解水体富营养化方法中生物控制法是较好之一。主要包括湿地构建法、水生植物法、水生动物法、微生物法和附着藻类法等,但生效周期较长,后期维护工作量较大。附着藻类法相比其他方法,稳定性较高,维护成本较低,维护手段较简便,因此附着藻类对缓解水体富营养化具有很大价值。附着生物指附着在水体中任何基质表面的所有生物体集合,包括藻类、浮游动物、真菌、细菌、原生动物、昆虫幼体及其他附着的软体动物等<sup>[2]</sup>,附着在水体中所有基质表面上的全部藻类集合称为附着藻类<sup>[3]</sup>,着生藻类、周丛藻类和附生藻类是附着藻类别名<sup>[4]</sup>。

附着藻类作为藻类的一类群体,在水体的物质循环与能量流动中扮演着不可或缺的角色<sup>[5-6]</sup>,并且其生境相对稳定,处于生态系统食物链的始端,生活周期较短,对污染物反应较为灵敏,其种类组成可以很好地指示水体的营养状况,进而为水质变化提供早期预警信息<sup>[7-9]</sup>。国内外大量研究<sup>[10-15]</sup>还表明,附着藻类可以通过自身的转化吸收能力,有效地将氮磷从对水体环境中去除。此外,部分底栖附着藻类在进行生命活动时还会附着区域附近的 pH 值升高,加快自身对磷的吸收以及提高沉积物中的磷含量,甚至还会构造出特殊的有氧环境,阻碍磷从沉积物中进入水

体<sup>[16]</sup>,从而起到减少水体中磷含量的效果。因此,附着藻类在水体实时监测、缓解水体富营养化方面具有很大的作用。附着基质是影响附着藻类生物学特征的一个重要因素<sup>[17-19]</sup>,科学合理地选择附着基质有助于更好地开发附着藻类在水质净化和水生态保护方面的潜力。

因此,基于附着基质对附着藻类影响研究结果不一致的现状<sup>[20]</sup>,为达到资源再利用、经济效益高和绿色环保的目的,响应“绿水青山就是金山银山”的号召,本试验选择 3 种常见建筑材料的边角料——花岗岩(裴国凤等<sup>[21]</sup>人关于附着藻类的研究中显示与自然基质上群落组成最接近)、木板(是水体中常见的基质,但很少用作附着藻类的附着基质<sup>[22]</sup>)和聚乙烯网(Khatoon<sup>[23]</sup>关于附着藻类的研究中显示聚乙烯上附着藻类生物量最大)作为附着基质的原材料。开展不同附着藻类生物学特征的试验,并进行水质指标与藻类生物学特征的深入分析,以期筛选科学合理的附着基质,丰富附着藻类着生提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品来源

初始用水采集自上海临港新片区某大型人工景观湖,取 3 次测定的平均值(详见表 1),附着藻类是由采集水中的藻类附着培育而成。

表 1 培育用模拟初始水质

Table 1 Initial water quality for cultivation

指标	pH 值	温度/℃	盐度/‰	溶解氧/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	硝氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	亚硝氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg·L <sup>-1</sup> )
数值	8.910±0.008	27.600±0.000	0.390±0.000	8.250±0.132	0.346±0.010	0.000±0.000	0.006±0.000	0.457±0.026	0.049±0.002

注:表中数据为 3 个重复的平均值。

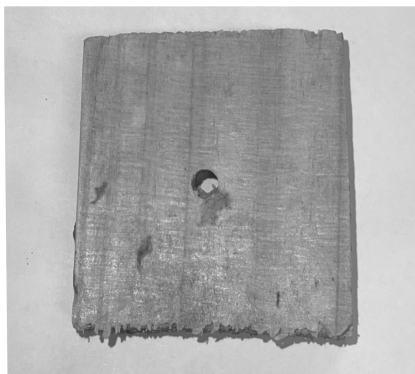
### 1.2 附着基质

试验附着基质规格边长均为 5 cm 的正方形。分

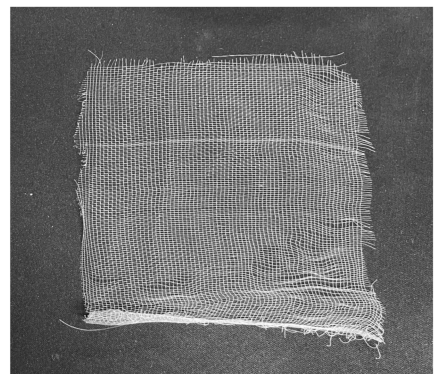
别是花岗岩基质(G, granite)、木板基质(W, wood)和聚乙烯网基质(P, polyethylene mesh)(图 1)。



花岗岩



木板



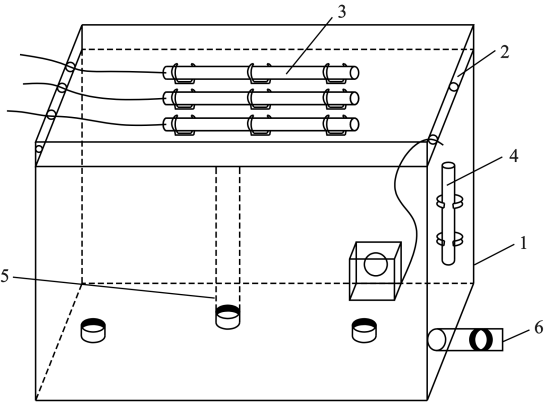
聚乙烯网

图 1 培育用附着基质

Fig.1 Substrates for cultivation

### 1.3 试验装置

附着藻类培育试验装置由鱼缸改造而成(如图 2 所示)。附着基质均用 0.1 mm 的鱼线悬挂于培育缸中水面下 30 cm。试验共设 4 组,每组放置 8 块基质。不放基质的 CK(空白对照组)一组;Device-G(花岗岩基质组,G 组)一组;Device-W(木板基质组,W 组)一组;Device-P(聚乙烯网基质组,P 组)一组。



注:1 为塑胶缸底;2 为塑料缸盖(缸盖有小型开口,便于电线和水泵换气口伸出的小凹口);3 为位于缸盖内面的灯管及其塑料支架;4 为水泵及紧贴缸盖缸体结合处用于安放水泵和加热棒的塑料架台;5 为悬挂于缸体内部细绳及被固定的基质(下端的小圆柱体为基质示意);6 为缸体底部排水口及塑胶塞子。下同。

图 2 培育装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of cultivation device

### 1.4 光照与培育条件

光照、温度均模拟自然环境;培育缸中添加去离子水,始终维持在 50 L,从第 2 个周期的第 1 天起,每 2 个周期培育缸中添加 BG11 培养基(北京沃凯生物科技有限公司)和磷酸二氢钾(上海泰坦科技股份有限公司),满足藻类生长所需微量元素和营养盐。

### 1.5 附着藻类测定

每次采集藻类均在加入营养盐前,每隔一个周期(Cycle,CY,一个周期为 7 d)采集其中一块基质一面的藻类(每次不重复采集同一块基质),没有基质的一组采集玻璃缸壁上的藻类,每次采样均采 3 次,进行 3 次重复试验,取其均值进行图形绘制。用纯水 100 ml 加入福尔马林 3 ml 和鲁哥试剂 1.5 ml 染色固定,密封静置 24 h 后去除清液至体积为 30 ml(可根据藻类密度大小稀释)。每次吸取 0.1 ml 样品置于 0.1 ml 的计数框中,在光学显微镜 10×40 视野下观察,藻类种类鉴别参考《中国淡水藻类:系统、分类及生态》和《中国淡水生物图谱》,生物量计算,采用细胞计数法。

### 1.6 水质测定

每次采集水样均在加入营养盐前,每次采样均采

3 次,进行 3 次重复试验。pH 值、温度(T)、溶解氧(DO)和盐度(SAL)采用便携式测定仪测定;总氮(TN)用碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定、总磷(TP)用钼锑钨分光光度法测定、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)用纳氏试剂光度法测定、硝氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)用紫外分光光度法测定、亚硝氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)用重氮偶合分光光度法,化学需氧量(COD)用高锰酸盐指数法测定,具体步骤依据《水和废水监测分析方法》。综合水质标识指数法原理简单、易于操作,能完整表达总体的综合水质信息,广泛应用于水质监测和评估中。根据国家《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》的溶解氧(DO)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)总氮(TN)、总磷(TP)的项目标准划分,用综合水质标识指数法(comprehensive water quality identification index,  $I_{wq}$ )分析水环境质量的级别。计算公式为:

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (1)$$

式中: $X_1$  为河流总体的综合水质类别; $X_2$  为综合水质在  $X_1$  类水质变化区间内所处位置; $X_3$  为参与综合水质评价的水质指标中劣于水环境功能区目标的单项指标个数; $X_4$  为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果,表明综合水质的污染程度。具体计算参考文献[24]。

### 1.7 总酚和可溶性糖测定

总酚和可溶性糖的测定均采用试剂盒法,总酚试剂盒采购与上海源叶生物科技有限公司,可溶性糖试剂盒采购与南京建成生物工程研究所。

### 1.8 数据处理

用 Excel 2022 与 SPSS 2021 进行数据分析;用 Origin 2021 和 PRIMER 6.0 进行图形绘制。

## 2 结果

### 2.1 总氮(TN)和总磷(TP)去除率变化

4 个试验组每个周期的 TN,TP 去除率如图 3 所示。每个周期的第 1 天测样,因此 CY<sub>1</sub> 的去除率为 0,除 CK 组的 TN 去除率外,TN 去除率从第 2 个周期开始,均呈现低—高一低—高的态势;从 CY<sub>4</sub> 开始,CK 组的 TN 去除率相比同周期的另外三组较高,但到 CY<sub>9</sub> 时,4 组的去除率相差不大;TP 去除率则是从第 4 个周期开始呈现低—高一低—高的态势。

### 2.2 综合水质标识指数( $I_{wq}$ )变化

4 个组别的综合水质标识指数( $I_{wq}$ )变化如图 4 所示。4 个试验组的  $I_{wq}$  指数均呈现先降低后升高的态势,且都较为接近。



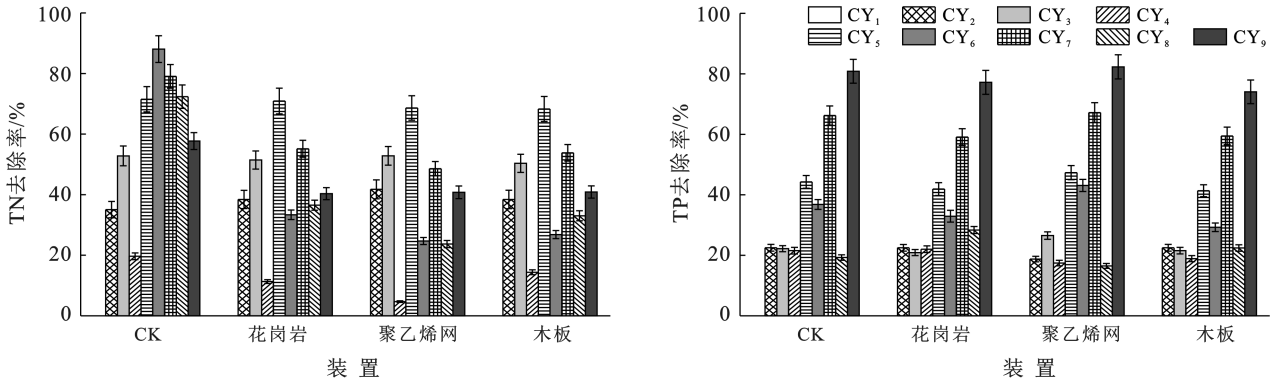


图 3 不同装置内 TN, TP 营养盐去除率

Fig.3 Removal rate of total nitrogen and total phosphorus in different devices

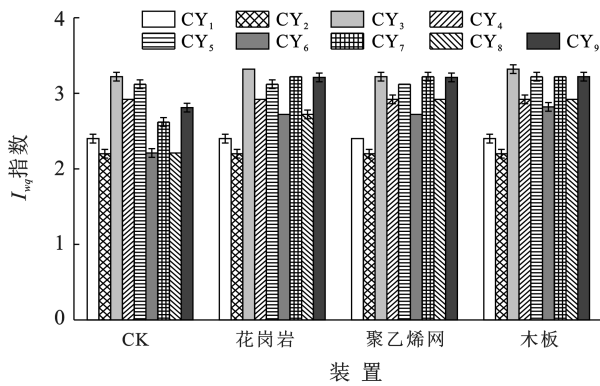
图 4 不同装置内综合水质标识指数 ( $I_{wq}$ ) 变化

Fig.4 Variation of comprehensive water quality identification index in different devices

### 2.3 藻类生物量及种类变化

本文藻类生物量按藻类密度和细胞湿重的乘积来计算,结果如图 5 所示。CK 组和 G 组生物量略高于 P 组和 W 组,但 4 种不同基质上的附着藻类最终所达到的最大生物量相差不大,且都在  $CY_8$  达到了最大值;在附着藻类生长至群落最大生物量的过程中, W 组的附着藻类种类数量始终处于增加中,而另外 3 组附着藻类的种类数量在过程中均有回落;CK 组的附着藻类种类数量在群落稳定后,明显少于其他 3 组。

### 2.4 附着藻类密度及多样性变化

如图 6 所示,4 个试验组的附着藻类最大密度均在  $CY_8$  达到最大,且除 G 组的藻类密度在  $CY_9$  有一定的下降外,均较为稳定,CK 组和 P 组的藻类最大密度稍高于 G 组,较高于 P 组;CK 组和 W 组的 Margalef 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数均明显低于 P 组和 W 组, G 组和 W 组的 3 种多样性指数均十分接近。

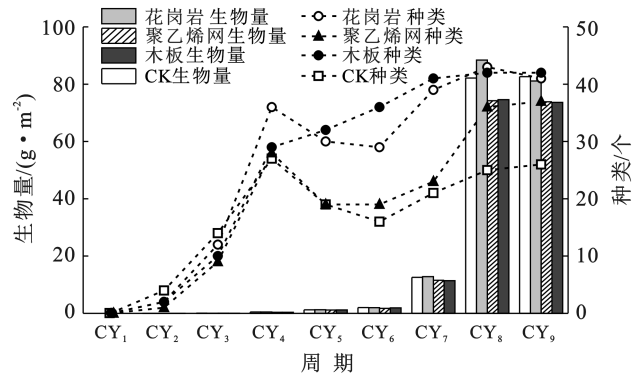


图 5 附着藻类的生物量和种类数量变化

Fig.5 Variation of biomass and species of periphytic algae

### 2.5 附着藻类群落的聚类分析

由于  $CY_1$  初始时不存在附着藻类,因此聚类分析时去除了  $CY_1$ 。由聚类分析和多维尺度分析 MDS 图的结果可知(图 7),附着藻类的群落发展过程主要分为 3 个阶段。第 1 阶段为包括  $CY_2$  和  $CY_3$ ,第 2 阶段包括  $CY_4$ ,  $CY_5$  和  $CY_6$ ,第 3 阶段包括  $CY_7$ ,  $CY_8$  和  $CY_9$ ;且明显可以看出 G 组和 W 组相似度较高,CK 组和 P 组相似度较高。相似性(ANOSIM)分析还表明附着藻类的群落结构在发展过程中差异极显著 ( $p < 0.001, r = 0.928$ )。

### 2.6 附着藻类群落优势种属

本试验取相对丰度大于 2% 为优势种<sup>[25-26]</sup>,以藻类群落稳定后的  $CY_8$  和  $CY_9$  为优势种进行划分。由图 8 可知,CK 组的优势种属均为蓝藻门,颤藻属的小颤藻和颤藻相对丰度最大;G 组的优势种属中,绿藻门占多数,绿藻门鞘藻属相对丰度最大;P 组的优势种属中,蓝藻门占多数,蓝藻门细鞘丝藻相对丰度最大;W 组的优势种属中,绿藻门占多数,绿藻门鞘藻属相对丰度最大。

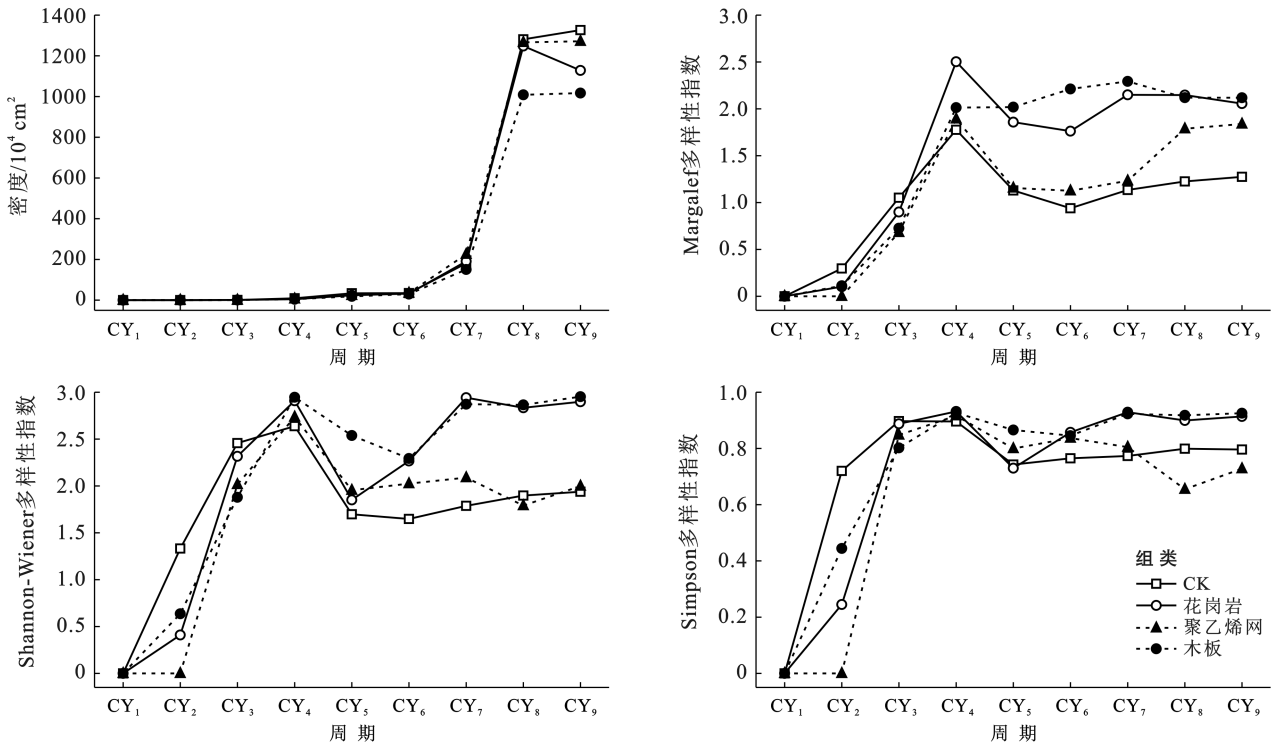
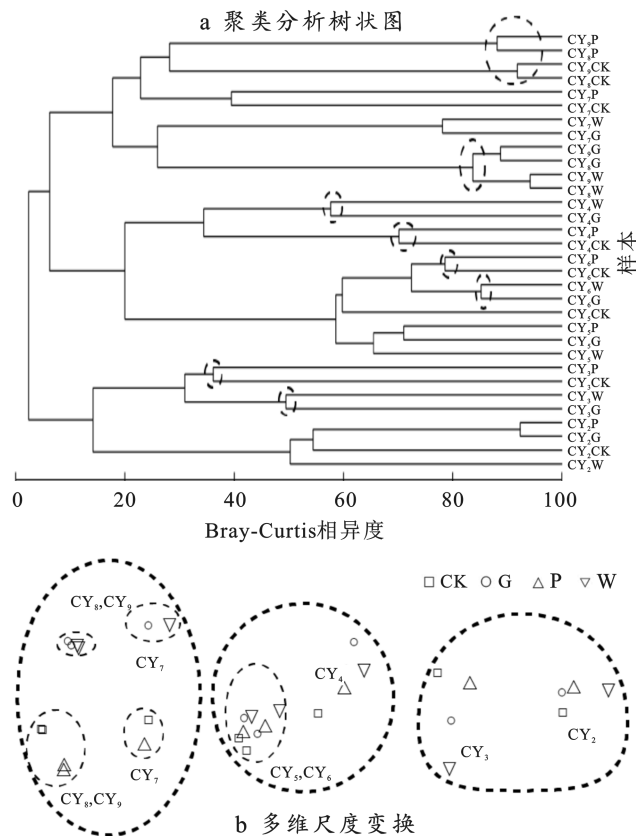


图 6 附着藻类的密度及生物多样性指数

Fig.6 Density and biodiversity index of periphytic algae



注:CK 为对照; G 为花岗岩; P 为聚乙烯网; W 为木板。

图 7 附着藻类群落的聚类分析树状图和多维尺度变换  
Fig.7 Clustering dendrogram and multidimensional scale conversion of periphytic algae community

### 2.7 附着藻类总酚和可溶性糖含量

取附着藻类群落稳定后的总酚和可溶性糖含量为准,表 2 中数据为 CY<sub>8</sub> 和 CY<sub>9</sub> 两个周期的平均值。总酚含量由高到低为 P 组、W 组、CK 组、G 组,可溶性糖含量由高到低为 G 组、CK 组、W 组、P 组。

表 2 总酚和可溶性糖含量

样品分组	CK	G	P	W
总酚	0.23	0.21	0.26	0.25
可溶性糖	150.28	159.18	133.05	148.11

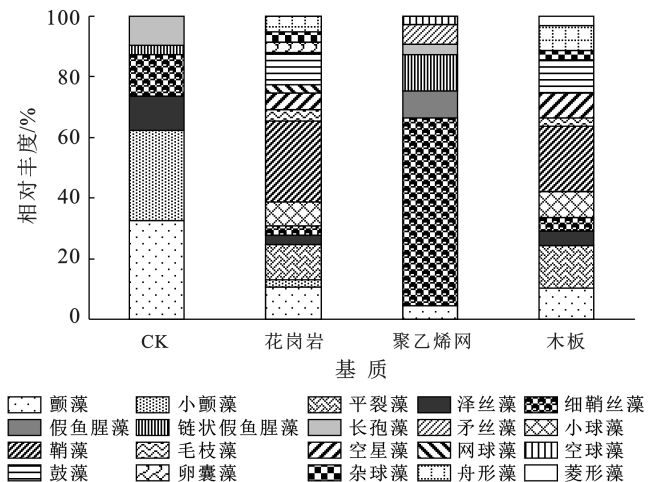


图 8 附着藻类的群落优势种

Fig.8 Dominant species of periphytic algae community

## 3 讨论

### 3.1 试验水质变化

本研究中,4 组的 pH 值、盐度和温度全程变化不大,处于相对稳定的状态,可能是因为试验处于室内环境中,收到外界干扰小;而溶解氧由于水泵的增氧,同样保持稳定状态;4 组的 COD 则是呈现缓和的上升趋势,一方面可能与营养盐的加入有关,另一方面可能与试验装置内藻类生物量的增长有关。在营养盐的变化上,除 CK 组的 TN 去除率外,各周期的 TN 和 TP 去除率均表现为添加营养盐后的一个周期要高于相邻的周期,而  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  的基本变化趋势同 TN 和 TP 相一致,这可能是由于营养盐的加入促进了藻类的生长活性和代谢速率,也加快了藻类对营养盐的吸收<sup>[27-28]</sup>。但在 4 组的附着藻类均达到群落最大生物量后,它们的 TN 和 TP 去除率均较为接近,4 组的  $I_{wq}$  指数也较为接近;且本研究也分别对水质指标与附着藻类密度,水质指标与附着藻类 3 大门的密度进行了相关性分析,相关性并不显著,这可能是水体中的浮游藻类及附着在缸体内部其他部位的藻类都对水体的营养盐起到一定的影响<sup>[8]</sup>,导致附着基质上附着藻类对营养盐的作用被掩盖,相关性被削弱。但与附着藻类群落发展的前中期相比,群落稳定后的 TN 和 TP 去除率有微小的降低, $I_{wq}$  指数也有一定的升高,综合水质均处于 3 类水和 4 类水交界处,有小幅度的变差,这可能是附着藻类在群落结构稳定和生物量达到最大值后,对营养盐的需求较群落发展的前中期减少<sup>[3,29]</sup>,导致在加入相同营养盐之后,呈现出较前中期相比,营养盐去除率降低,综合水质变差的状况。

### 3.2 附着藻类生物学特征变化

3.2.1 附着藻类种类数量和生物量 本研究中,4 个试验组附着藻类群落稳定后,G 组和 W 组的附着藻类种类数量相近,高于 P 组,远高于 CK 组,这可能与 4 组附着基质的粗糙度和相对表面积等理化性质有关,G 组、W 组和 P 组的基质粗糙度均大于 CK 组,G 组和 W 组的相对表面积大于 P 组和 CK 组,导致 G 组、W 组和 P 组附着藻类的附着条件更多样,有利于藻类群落发展方向的多元化<sup>[20,30-31]</sup>。本研究中,4 组附着藻类群落稳定后,CK 组和 G 组附着藻类的最大生物量略高于 P 组和 W 组,与李晨曦等<sup>[29]</sup>和裴国凤等<sup>[21]</sup>的研究结果相吻合;CK 组和 P 组最大生物量占比以蓝藻门为主,均超过了 80%,而 G 组和 W 组的最大生物量占比以绿藻和硅藻为主,均达到了 65% 以上。综合 CK 组和 G 组附着藻类最大生物量相对

略高的现象,一方面可能是供附着藻类吸收的营养盐充裕、环境条件适宜,4 组附着藻类均可以安稳发展;另一方面可能与基质的颜色、透明度、重量等理化性质有关,CK 组的附着基质为无色透明的玻璃缸内壁,玻璃两面透光的特性使 CK 组的附着藻类吸收到了更多的光<sup>[32]</sup>,P 组和 W 组的附着基质重量小于 G 组,较 CK 组和 G 组受到的水流扰动稍大<sup>[33-34]</sup>,上述因素最终导致 4 组的最大生物量及其组成产生了差异。4 个试验组的附着藻类的生物量在第 6 周期末,第 7 周期初开始指数级增长,达到  $10 \text{ g} \pm 1 \text{ g/m}^2$ ,在第 7 个周期末,第 8 个周期初达到最大值  $80 \pm 7 \text{ g/m}^2$ ,这与宁晓雨等<sup>[35]</sup>对 3 种人工附着基质上附着藻类群落结构的研究结果不一致;本试验附着藻类达到最大生物量后的 2 个周期内生物量波动不大,这与陈姗等<sup>[36]</sup>对上海某河口景观湖冬季附着藻类群落变化的研究结果中生物量达到最大值后迅速出现下降的现象有差异,这可能是附着基质材质、面积、形状等理化性质不同,生长条件不同及室内外干扰程度不同等因素,导致附着藻类在生物量的稳定性和变化性有区别。

3.2.2 附着藻类总酚和可溶性糖含量 总酚含量在一定程度上与藻类群落的抗氧化活性呈正相关,而藻类群落成熟度与抗氧化活性呈负相关<sup>[37-39]</sup>,可溶性糖含量可为藻类群落的成熟度提供参考,成熟度越高,可溶性糖含量越大<sup>[40]</sup>,因此,通过对 4 组附着藻类总酚和可溶性糖含量的分析,可对附着藻类群落成熟度的判定起到辅助作用。本研究中,4 个试验组附着藻类群落稳定后,总酚含量相差不大,G 组的总酚含量是 4 组中相对最低的,G 组的可溶性糖含量是 4 组中最高的,表明了 G 组附着藻类群落的成熟度较其他 3 组略好。

3.2.3 附着藻类群落构成 CK 组和 P 组的附着藻类群落最大密度稍高于 G 组,较高于 W 组,4 组均主要由蓝藻门、绿藻门和硅藻门这 3 大门组成,这 3 门占了附着藻类群落细胞数量的 99% 以上,这与王梦雪等<sup>[41]</sup>研究聚碳酸酯塑料对附着藻类群落影响的结果相一致。从第 2 周期开始对附着藻类群落细胞数量进行聚类分析的结果表明,附着藻类群落发展在时间尺度上可以明显分为 3 个阶段,且附着藻类的群落结构在发展过程中差异显著;在群落结构稳定的后期,CK 组和 P 组群落结构相似度较高,G 组和 W 组群落结构相似度较高。Margalef 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数的变化趋势相一致,分析结果表明,在附着藻类群落稳定后,G 组和 W 组多的物种多样性接近,明显高于 CK 组和 P 组,物种多样性指数越高,群落结构也更



加稳定,也更有利于附着藻类发挥它对水质的改善和提升作用<sup>[42-43]</sup>。附着藻类群落的优势种属的分析结果表明,G组和W组的优势种数目明显多于另外两组,CK组的6种优势种全都为蓝藻;G组的14种优势种中,5种为蓝藻,8种为绿藻,1种为硅藻;P组的7种优势种中,6种为蓝藻,1种为绿藻;W组的12种优势种中,5种为蓝藻,6种为绿藻,2种为硅藻。CK和P组的蓝藻占据了绝对的优势地位,这与王梦雪<sup>[44]</sup>不同塑料基质对周丛藻膜形成和发育的影响的研究结果相似;而G组和W组的绿藻优势地位更明显,使基质上各种藻类的优势度更均衡,避免了部分藻类优势度过高的状况,且G组和W组的蓝藻优势种较另两组少了鱼腥藻、长孢藻和矛丝藻这3种富营养功能群蓝藻,多了平裂藻这种中营养功能群蓝藻<sup>[45]</sup>。因此,从优势种属的分析来看,G组和W组附着基质上的环境有害型优藻类优势种更少,优势度更低,这两组的附着基质更适合应用于水环境中。综合4组附着藻类群落的生物学特征,可以发现,G组花岗岩基质和W组木板基质均适合附着藻类生长,且所附着的藻类环境有益度更高,有利于附着藻类发挥生态效应。这可能是G组和W组表面粗糙度较高,相对表面积较大,增强了对水中浮游藻类的截留,方便藻类在表面附着,丰富了藻类的多度<sup>[46-48]</sup>。但G组附着藻类群落的最大生物量及最大密度均稍高于W组,可能是同体积下花岗岩基质的重量较大,在水中不易晃动,减少了水流对附着在其表面藻类的冲击,提高了附着藻类群落的稳定性<sup>[20,34-35]</sup>。

## 4 结论

在本试验条件下,4个试验组的附着藻类群落约在6~7周的时间成熟。群落藻类最大密度、生物量和成熟度相差不大,但花岗岩和木板上的附着藻类物种多样性显著高于另2组且富营养功能群藻类明显减少,群落结构更稳定,抗外界干扰能力更强,环境有益度更高,均可用于富集附着藻类。

木板基质理化性质较花岗岩基质脆弱,在水中更易氧化、变质和变形,不利于藻类附着环境的稳定;相同体积下,其重量也远小于花岗岩基质,受到水浪冲击时更易移动,对藻类群落的保护性不如花岗岩。在利用建材废弃物充当人工基质培育附着藻类或将人工基质用于水环境的修复、保护和提升时,建议选用花岗岩基质。

试验缸体中除附着基质的附着藻类外,还有缸体内壁的附着藻类和浮游藻类,这些藻类的存在会妨碍探究水质指标与附着基质上藻类的相关性,还可能对

附着基质上的藻类群落产生一定的影响。因此后续可以通过增大附着基质在培育缸中的体积面积占比或者在缸壁上涂抹一层无害但不利于藻类附着的物质,减少上述因素的干扰,以进一步改进和完善试验。

## [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国生态环境部.中国生态环境质量公报[R].北京:中华人民共和国生态环境部,2021.
- [2] Sládečková A. Limnological investigation methods for the periphyton ("Aufwuchs") community [J]. The Botanical Review, 1962,28(2):286-350.
- [3] Balata D, Bertocci I, Piazzini L, et al. Comparison between epiphyte assemblages of leaves and rhizomes of the seagrass *Posidonia oceanica* subjected to different levels of anthropogenic eutrophication [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008,79:533-540.
- [4] 徐肖莹.上海市河道附着藻类群落结构特征及其对水环境指示作用的研究[D].上海:上海海洋大学,2017.
- [5] Liboriussen L, Jeppesen E. Structure, biomass, production and depth distribution of periphyton on artificial substratum in shallow lakes with contrasting nutrient concentrations [J]. Freshwater Biology, 2006,51:95-109.
- [6] 马牧源,崔丽娟,张曼胤,等.白洋淀附着藻类的初级生产力及其与水质的关系[J].生态学报,2018,38(2):443-456.
- [7] Hoagland K D, Roemer S C and Rosowski J R. Colonization and community structure of two periphyton assemblages, with emphasis on the diatoms (Bacillariophyceae) [J]. American Journal Botany, 1982,69:188-213.
- [8] 刘园园,阿依巧丽,张森瑞,等.着生藻类和浮游藻类在三峡库区河流健康评价中的适宜性比较研究[J].生态学报,2020,40(11):3833-3843.
- [9] Granitto M, Lopez M E, Rodriguez P. Periphyton structure and stoichiometry along a gradient of urban land use in sub-antarctic streams from Tierra del Fuego, Argentina [J]. Hydrobiologia, 2022,849(16):3515-3529.
- [10] Dodds W K, Smith V H, Lohman K. Nitrogen and phosphorus relationships to benthic algal biomass in temperate streams [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2002,59(5):865-874.
- [11] Westhead E K, Pizarro C, Mulbry W W. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: elemental composition of algal biomass at different manure loading rates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004,52:7293-7296.
- [12] Dodds W K. The role of periphyton in phosphorus retention in shallow freshwater aquatic systems [J]. Journal of Phycology, 2003,39:840-849.
- [13] Jobgen A M, Palm A, Melkonian M. Phosphorus removal from eutrophic lakes using periphyton on submerged artificial substrata [J]. Hydrobiologia, 2009,

- 528:123-142.
- [14] Kufel L, Ozimek T. Can Chara control phosphorus cycling in Lake Luknajno (Poland)? [J]. Nutrient Dynamics and Biological Structure in Shallow Freshwater and Brackish Lakes, 1994,275:277-283.
- [15] Carlton R G, Wetzel R G. Phosphorus flux from sediments: effect of epipellic algal oxygen production [J]. Limnology and Oceanography, 1988,33:562-570.
- [16] Roberts E, Kroker J, Korner S, et al. The role periphyton during the recolonization of a shallow lake with submerged macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2003, 506:525-530.
- [17] 刘霞,陈宇炜.刚毛藻(*Cladophora*)生态学研究进展[J].湖泊科学,2018,33(9):31-34.
- [18] 田晓萌,裴海燕,徐杭州,等.淡水有害底栖蓝藻研究进展[J].生态学杂志,2020,39(6):2070-2085.
- [19] 周彦锋,周游,尤洋.五里湖人工基质上着生藻类群落结构及其影响因子研究[J].水生态学杂志,2017,38(2):57-64.
- [20] 宋玉芝,张亚冬,郑建伟,等.淡水湖泊附着藻类生态学研究进展[J].生态学杂志,2016,35(2):534-541.
- [21] 裴国凤,刘梅芳.武汉东湖底栖藻类在不同基质上生长的比较[J].湖泊科学,2009,21(3):357-362.
- [22] 陈向.南亚热带两条小型溪流底栖硅藻群落季节变化特征研究[D].广东 广州:暨南大学,2012.
- [23] Khatoun H, Yusoff F M D, Banerjee S, et al. Use of peri-phytic cyanobacterium and mixed diatoms coated substrate for improving water quality, survival and growth of *Penaeus monodon* Fabricius postlarvae [J]. Aquaculture, 2007,271:196-205.
- [24] 徐祖信.我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报,2005,33(4):482-488.
- [25] 王纤纤,刘乐乐,杨学芬,等.基于周丛藻类的雅鲁藏布江流域水生态系统健康评价[J].水生生物学报,2022,46(12):1816-1831.
- [26] 薛浩,郑丙辉,孟凡生,等.甘河着生藻类群落结构及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2020,29(2):328-336.
- [27] 宋玉芝,吴雨霏,李浩然.太湖附泥藻类时空分布及其与环境因子的关系[J].环境工程,2023,41(1):18-25.
- [28] 谈冰畅,蔡永久,安苗,等.水体氮质量浓度升高对附着藻生长和元素计量特征的影响[J].生态环境学报,2016,25(8):1376-1381.
- [29] Karez R, Engelbert S, Kraufvelin P, et al. Biomass response and changes in composition of ephemeral macroalgal assemblages along an experimental gradient of nutrient enrichment [J]. Aquatic Botany, 2004,78(2):103-117.
- [30] 李晨曦,高雨萱,张佳祺,等.附着在不同微塑料表面的藻类结构与群落组成[J].中国环境科学,2020,40(8):3360-3366.
- [31] 兰波,向贤芬,贾延亭,等.洱海流域沿岸带石质基质上周丛藻类群落研究[J].中国环境科学,2011,31(11):1881-1887.
- [32] Fisher J, Dunbar M J. Towards a representative periphyton diatom sample [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007,11(1):399-407.
- [33] Flynn K F, Chapra S C. Evaluating hydraulic habitat suitability of filamentous algae using an unmanned aerial vehicle and acoustic doppler current profiler [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020,146(3):1-11.
- [34] 朱宇轩,米武娟,李波,等.南水北调中线干渠两个水工构筑物对着生藻类群落的影响[J].水生生物学报,2021,45(4):817-825.
- [35] 宁晓雨,陶贻亮,梅才华,等.3种人工附着基对富营养水体水质的改善效果比较[J].环境生态学,2021,3(11):63-66,72.
- [36] 陈姗,柳昭莹,张玮,等.上海某河口型景观湖冬季附着藻类的建群过程初探[J].生态与农村环境学报,2019,35(3):345-351.
- [37] 王雅倩,安可婧,黄桂颖,等.不同年份老香黄活性成分、抗氧化活性及挥发性成分分析[J].食品与发酵工业,2023,49(21):221-232.
- [38] 于金慧,尤升波,边斐,等.隐甲藻藻渣醇水提取物的抗氧化活性研究[J].海洋学报,2018,40(8):129-137.
- [39] 何善生.螺旋藻中活性物质的提取、性能及应用[D].福建 厦门:集美大学,2018.
- [40] 李树青,杨波,李东方,等.欧李果实不同(成熟)阶段不同部位酚类物质含量比较[J].安徽农业大学学报,2022,49(5):750-754.
- [41] 王梦雪,尹思成,王振方,等.不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响[J].环境科学,2023,44(1):243-251.
- [42] 王狄宁,艾克拜尔·依米提,吕海英.新疆北部地区湿地鼓藻类植物多样性及其与环境因子的关系[J].西北植物学报,2022,42(12):2123-2132.
- [43] 张琪,苑博,周静,等.基于附着藻类多样性和 TLI 的府河水水质评价[J].河北大学学报,2020,40(5):536-542.
- [44] 王梦雪.不同塑料基质对周丛藻膜形成和发育的影响[D].上海:上海海洋大学,2022.
- [45] Padišák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009,62(1):1-19.
- [46] Wan Juan Juan, Liu Xuan, Kerr P G, et al. Comparison of the properties of periphyton attached to modified agro-waste carriers [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(4):3718-3726.
- [47] 陈丹,高光,汤祥明,等.人工载体理化性状对附着生物水质修复能力的影响[J].湖泊科学,2013,25(1):39-46.
- [48] 伍良雨,吴辰熙,康杜.载体对周丛生物生物量和群落的影响研究[J].环境科学与技术,2019,42(1):50-57.